

## 액상 충돌 제트의 혼합에 대한 분사공 직경비의 영향

유병일<sup>†</sup> · 이성웅\* · 조용호\*

### Effect of Orifice Diameter Ratio on Unlike Impinging Jet Mixing

B. I. Yu, S. W. Lee and Y. H. Cho

**Key Words:** Mixing Efficiency(혼합효율), Orifice Diameter Ratio(오리피스 직경비), Mixing Factor(혼합계수)

#### Abstract

Experimental studies has been conducted to investigate the effect of orifice diameter ratio on the mixing characteristics of the split element of doublet and triplet elements. The spray characteristics of non-reacting immiscible liquids have been investigated using a patternator. The local volume fraction is measured by use of mean value of each component. This volume measurement represents the mixing characteristics of the liquid, which affect the overall combustion efficiency. The ratio of the orifice diameter, ranging from 1 to 1.5, and that of the jet-momentum, ranging from 0.5 to 6.0, are used. The jet impinging behavior with use of various ratios exhibits substantially different mixing characteristics. Mixing efficiency is maximized when the jet-momentum ratio is increased; this behavior is particularly prominent when the orifice diameter ratio is greater than unity. The split of the triplet element yields better mixing characteristics and is more effective than that of the doublet element in regard to achieving high combustion efficiency. The optimum mixing factor for the triplet element is found to be 0.75, according to our measurement.

#### 기호설명

$D$  : 분사기 분사공 직경(mm)  
 $L$  : 분사기 분사공 길이(mm)  
 $L/D$  : 분사공 길이/직경비  
 $M_t$  : 총 질량(kg)  
 $M_f$  : 국소질량(kg)  
 $R$  : 총 산화제/연료 질량비  
 $MR$  : 운동량 비( $M_o/M_f$ )  
 $Mr$  : 정규화된 국소 혼합비  
 $mr$  : 국소 혼합비  
 $\dot{m}$  : 질량유량(kg/s) 또는 총 샘플 수( $m = n + \bar{n}$ )

$n$  :  $\gamma < R$ 의 샘플 수  
 $\bar{n}$  :  $\gamma > R$ 의 샘플 수  
 $\gamma$  : 국소 혼합 비율( $\gamma < R$ 의 샘플 수)  
 $\bar{\gamma}$  : 국소 혼합 비율( $\gamma > R$ 의 샘플 수)  
 $\rho$  : 밀도 ( $\text{kg/m}^3$ )

#### subscript

$f$  : 연료  
 $o$  : 산화제

#### 1. 서 론

액체로켓엔진에 사용되는 충돌식 분사요소는 산화제와 연료의 액상제트가 분사기면에서 일정거리 떨어진 지점에서 임의의 충돌각을 가지고 충돌된다. 여기서 충돌시 제트 모멘텀의 소산적 교환은 직접적으로 기계적

(2006년 10월 19일 접수 ~ 2006년 11월 17일 심사완료)

\* (주)마이크로프랜드

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국항공우주연구원

E-mail : biyoo@kari.re.kr

TEL : (042)860-2805 FAX : (042)860-2699

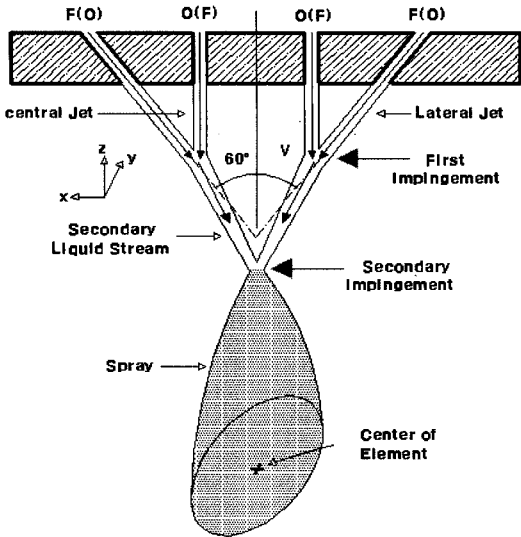


Fig. 1 Spray formation of split triplet jet with included angle between the lateral jets of 60°

혼합을 유발시키고, 대부분의 혼합 및 미립화는 충돌점 근처에서 생성되며(Fig. 1) 이러한 충돌과정을 통해 미립화와 혼합분포가 적절하게 조절되어 분사형태를 완성한다.

액체로켓의 추력증대와 연소실의 물리적 크기를 최소화해야 하는 필요성 그리고 효과적인 연소를 위해, 추진제의 거주시간(residence time)을 짧게 하고, 변위체적(displacement volume)을 좀 더 크게 하는 것이 요구된다. 특히 거주시간은 연소효율 및 연소안정화에 직접적인 영향을 미치므로 제한을 두고 있으나, 연소과정이 매우 빠르게 진행되므로 무화된 추진제의 확산 및 난류운동량에 의한 완전한 기상 혼합은 매우 어렵다. 따라서 충돌형 제트의 연소는 1차적으로 추진제의 충돌시 모멘텀에 의한 기계적 혼합지배형(mixing controlled combustion)으로 진행된다고 할 수 있으며, 충돌형 분사기(impinging injector element)의 경우, 분사공의 직경과 직경비가 혼합과 미립화의 정도를 결정하는데 중요한 역할을 한다<sup>(1-9)</sup>.

이와 같은 혼합에 대한 연구가 Rupe, Heidmann, Dombrowski에 의해 광범위하게 이루어져 왔으며<sup>(2-6)</sup>, 주로 혼합성능에 대한 연구결과가 주류를 이루고 있다. 그러나 혼합메카니즘에 대해 직접적인 측정을 통한 이해가 매우 제한적이기 때문에 미립화 연구에 비해 연구결과가 적게 보고되고 있다. 최근 들어 Cho와 Yoon<sup>(7, 8)</sup> 등은 혼합과 관련된 각종 연구결과를 제시하고 있다. 이외

에 Nurick과 McHale<sup>(10)</sup>은 혼합특성에 분사공 형상이 미치는 영향에 대해 연구하였으며, 분사공의 길이 대 직경비(L/D)에 따른 캐비테이션 발생에 대한 연구 결과를 보고하였다. Sato<sup>(11)</sup>는 대기 하에서 비연소 혼합시험을 통해 연소성능을 예측하고, 트리에틸아민/질산 조합의 연소시험을 수행함으로써 비연소 시험 결과와 연소시험 결과를 비교분석하였으며, 연소성능은 혼합지배적임을 증명하였다.

본 연구에서는 분리충돌형(unlike split triplet impinging) 분사요소에서 분사공 직경비가 혼합성능에 미치는 영향을 고찰하고 앞서 연구된 이중충돌형(unlike doublet impinging) 인젝터에서의 연구 결과<sup>(16)</sup>와 비교/분석하였다.

## 2. 혼합 성능

### 2.1 혼합 파라메타

충돌형 제트의 혼합 및 혼합에 지배적인 연소효율은 운동량비, 제트의 유속, 유량 혹은 이중충돌형 요소에 국한하여 Rupe수 등을 사용하여 나타낼 수 있으며, Heidmann, Dombrowski, Hooper<sup>(4, 5)</sup> 등은 충돌제트 분무의 혼합에 영향을 미치는 요소로 기학적 요소인 충돌각을 포함시켰다. 특히 제트유속과 충돌각은 제트충돌시 수평성분(x방향)의 운동량의 교환 정도를 결정할 수 있으며, 액상 혼합 시 상대제트의 침투정도를 예측할 수 있다.

2개 혹은 그 이상의 제트가 충돌할 때, 액상제트는 충돌점 근처에서 바로 액적으로 붕괴되며, 상대제트의 관성은 분무구조를 결정하는 요소로 작용한다. 국부적인 유량분포 혹은 혼합비 분포는 액상제트 충돌시 운동량 교환 및 상대제트의 침투정도에 따라 결정되고, 액막의 붕괴는 일반적으로 공기역학적, 수력학적 상호작용에 의해 발생하는 불안정한 충돌파동(impact wave)에 의해 이루어진다<sup>(12)</sup>. 또한, 높은 레이놀즈수 영역에서 운동량 교환에 의해 발생된 수력학적 충돌파동은 액막 전체에 주기적으로 나타나며, 제트의 운동량교환은 직접적인 기계적인 혼합을 유도한다. 따라서 액상제트의 모멘텀비(MR)는 간단하게 산화제 모멘텀비에 대한 연료의 모멘텀비 $((\rho V^2 D^2)_O / (\rho V^2 D^2)_F)$ 로 정의되며, 제트유속과 기학적 요소를 포함하는 매우 중요한 혼합 파라메타로 사용된다. 본 연구는 혼합 파라메타로서 모멘텀비를 사용하였다.

2.2 혼합효율

연소효율은 거시적으로 액상혼합의 균일성에 의해 결정된다. 그러므로 분사된 추진제의 질량분포와 혼합비 분포는 혼합지배적인 연소에 매우 중요한 요소로 작용하며, 이러한 혼합의 질(quality)을 정의하기 위해 혼합효율을 사용한다. 이와 관련하여 Rupe<sup>(13)</sup>는 식 (1)과 같이 혼합효율을 통계학적으로 정의하였으며, 일반적으로 충돌형 분사기의 혼합효율  $\eta_{mix}$ 는 분사된 추진제의 국부 혼합비가 총 혼합비로부터 이탈된 정도로 표현된다.

$$\eta_{mix} = 100 \left[ 1 - \left\{ \frac{\sum_1^n \frac{M_i(R-\gamma)}{M_i R} + \sum_1^{\bar{n}} \frac{M_i(R-\bar{\gamma})}{M_i(R-1)}}{\dots} \right\} \right] \quad (1)$$

여기서  $\eta_{mix}$ 는 0~100%의 범위를 나타낸다. 즉,  $\eta_{mix}=100\%$ 는 총 혼합비와 전체의 국소 혼합비가 동일한 경우이고,  $\eta_{mix}=0\%$ 는 혼합이 전혀 일어나지 않은 상태를 의미한다.

2.3 특성속도

액체로켓엔진의 연소성능은 이론적 특성속도와 실험적 특성속도의 비로 정의되며, 액체로켓엔진 성능의 지표인 비추력은 특성속도  $C^*$ 의 비례함수로서 특성속도에 의해 좌우된다. 또한 특성속도는 추진제의 유효에너지 레벨과 인젝터 및 연소실 디자인의 질(quality)을 평가하기도 한다. 혼합특성속도  $C^*_{mix}$ 는 비연소 혼합실험의 결과로부터 연소시의 특성속도  $C^*$ 를 예측하는데 사용되며 식 (2)와 같이 정의된다<sup>(14)</sup>. 여기서 특성속도 효율은 단 열화염온도에 대한 연소효율로 정의된다.

최적 혼합비 설계는 특성속도와 상관관계를 가지고 설정되므로, 연소성능은 추진제의 혼합 지배적이라고 말할 수 있다<sup>(9)</sup>. 따라서 인젝터 설계시 연소성능을 고려하기 위해 비연소 혼합실험의 결과로부터 추진제의 혼합 특성속도  $C^*_{mix}$ 를 산출하고 분석하는 것이 필수적이며 혼합특성속도는 연소시의 특성속도  $C^*$ 를 예측하는데 사용된다.

$$C^*_{mix} = \sum_1^m C^*_{theo} \cdot M_i / M_t \quad (2)$$

기계적 요인을 배제한 이론 특성속도  $C^*_{theo}$ 는 Gordon 등<sup>(15)</sup>의 fast chemistry 방법을 사용하여 압력과 혼합비

를 변수로 하여 계산되었다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 인젝터

실험에 사용된 분사기는 분리충돌형 제트로 Fig. 1과 같은 분사구조를 갖는다(FOOF). 분리 충돌형 분사기는 FOOF 또는 OFFO의 충돌형태로 구분 지을 수 있으며 여기서 O는 산화제(oxidizer), F는 연료(fuel)를 의미한다. 두 개의 외곽 분사공 사이에 별도로 두 개의 평행 분사공이 추가된다. 본 연구에서 사용된 충돌형 분사기는 최적의 혼합특성을 가진 것으로 알려진 충돌각 60°를 사용하였다. 분리 충돌형 분사기는 중심선에 대칭하여 양쪽에서 1차 충돌이 이루어지고 충돌에 의하여 제트 또는 팬으로 변화된 2차 액주는 다시 하류에서 2차로 충돌된다. 길이-직경 비(L/D)는 분사기 분사공 내에서 캐비테이션(cavitation)의 영향을 배제시킬 수 있는 최소값인 6으로 고정하였다<sup>(8)</sup>.

3.2 실험장치 및 방법

패터너이터(patternater)를 사용하여 분사된 모사 추진제의 질량분포 및 혼합효율을 측정하였다. 실험장치와 관련한 세부 내용은 참고문헌 16에 상세히 나타나 있다.

충돌식 분사요소에서 혼합효율과 혼합지배적인 연소효율은 제트의 유속, 추진제의 질량비, 운동량비, 충돌각에 의해 변화된다. 특히, 충돌각과 제트의 유속은 수평(horizontal)모멘텀 교환과 침투깊이 정도를 결정한다. 혼합지배 파라미터로는 운동량비를 사용하였으며, 충돌각은 최적의 혼합특성을 가진 것으로 알려진 60°를 사용하였고, 분사기 형태와 제트속도 이외의 모든 파라미터들을 고정하여 분사공 직경비에 따른 혼합특성의 변화를 고찰하였다.

또한, 혼합에 영향을 미치는 주요 요인으로는 제트가 분사되기 전 단계에서 일어나는 분사공의 형상, 분사조건에 따른 비선형성, cavitation, vena contracta 그리고 분사된 제트의 충돌에 의해 형성되는 수력파동과 이때 발생하는 제트 상호간 운동량 교환, 상대적으로 정지 상태에 있는 주위의 공기와 고속 제트간의 속도차이에 의한 공력파와 전단력을 들 수 있으나<sup>(10)</sup>, 본 연구에서는 상기와 같은 제트 충돌전의 변수들을 배제하였다. 또한, 공기 유동장과의 상호작용은 고려치 않았다.

액체 산소와 케로신의 추진제 조합을 대상으로 비한

응성 모사 산화제( $H_2O_{liq}$ : 밀도  $988 \text{ kg/m}^3$ )와 실제 연료(kerosene: 밀도  $807 \text{ kg/m}^3$ )에 의한 혼합분포를 측정하였다.

#### 4. 실험결과 및 토론

이중충돌식 및 분리 삼중충돌식 제트의 혼합의 질(quality)이 시스템적으로 측정되었으며, 분사공 직경비가 혼합에 미치는 영향을 비교분석 하였다. 분사공 직경비는 연료의 분사공 직경을 0.4 mm로 고정한 상태에서 산화제 분사공 직경을 0.4 mm, 0.5 mm, 0.6 mm로 변화시켜 실험하였다. 즉 직경비 1.0, 1.25, 1.5로 실험되었으며, 일반적으로 직경비 1.5이상의 분사요소는 분사형태가 과도하게 틀어지는 것을 막기 위해 거의 사용치 않는다.

액상제트의 유동특성은 혼합과정에 매우 큰 영향을 미친다. 따라서 분사제트의 레이놀즈 수를 운동량비 0.5부터 6.0의 범위에서 각각 2,500부터 12,000까지로 한정하여 난류제트를 유지하였고, 수력뒤집(hydraulic flip)을 피할 수 있는 한도 내에서 이론 산화제/연료 비(O/F ratio)를 기준으로 하여 운동량비를 변화시켜가며 실험하였다. 충돌형 분사기의 혼합효율,  $\eta_{mix}$ 는 분사 추진제의 국부혼합비가 총혼합비로부터 이탈된 정도로, 참고 문헌 1에 Rupe에 의해 정의된 대수평균관계식을 사용하였다.

##### 4.1 이중충돌형 인젝터

Figure 2에 서로 다른 분사공 직경비를 갖는 분사요소에 대한 혼합특성을 모멘텀비에 따라 나타내었다. 과거 이론적, 실험적 연구에서 분사공의 직경이 동일하고(분사공 직경비 1) 제트의 모멘텀이 동일할 때(모멘텀비 1) 최적의 혼합이 이루어지는 것이 일반적인 특성으로 알려져 있다<sup>(2,4,8)</sup>. 다시 말해 균일한 혼합을 위해서는 충돌 시 운동량 교환이 동일해야 하고, 침투깊이가 동일해야 한다. 그러나 실제로 산화제와 연료의 분사 압력 강하를 거의 동일하게 하고, 혼합비를 조절하기 위해 산화제 분사공을 크게 하기 때문에 직경비 1에서 최적혼합이 이루어진다는 것은 절대적이지는 않다. 즉, 분사공의 직경이 동일한 상태에서 혼합비를 맞추기 위해 유량을 증가시킬 경우 유속이 증가되고 이에 따라 분사형태가 틀어지며, 혼합 및 미립화 또한 한쪽으로 치우치게 된다. 그러므로 이와 같은 제트 모멘텀의 불균형에 의한

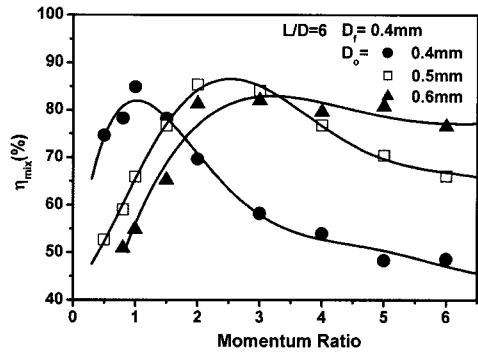


Fig. 2 Effect of diameter ratio on the mixing efficiency of unlike doublet element

혼합정도의 저하는 직경비의 증가에 의해 회복될 수 있다. 이것은 직경비 증가에 의해 감소된 산화제 제트 속도는 분사공 직경비에 의한 유량에 반비례하는 사실에 기인한다. 이와 관련하여 앞선 연구에서 유속에 따른 침투깊이에 대한 영향을 살펴보았다<sup>(16)</sup>. 직경비가 증가할수록 최대 혼합율을 나타내는 점이 모멘텀비가 증가되는 방향으로 이동되고 있음을 알 수 있다.

이것은 과거 연구결과와 일치하는 결과이다<sup>(8)</sup>. 또한, 직경비가 증가되었음에도 불구하고 최대혼합효율이 거의 변화되지 않음을 파악할 수 있다. 이는 직경비가 증가되어 분사형태 또는 혼합에 영향을 미쳐 혼합의 질을 변화시킬 수 있다고 추측할 수 있으나, 직경비 증대에 따른 산화제 유속의 감소에 의한 추진제의 모멘텀이 평형상태에 도달될 때 최대 혼합효율을 나타내므로 실질적으로는 큰 영향을 미치지 못하고 최대 혼합효율을 나타내는 모멘텀비의 변화만 있는 것이다. 또한 종래의 직경비가 1.22 이상에서는 혼합의 정도가 유지되고<sup>(8)</sup>, 분

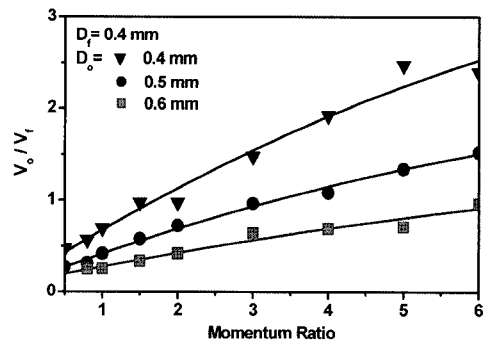


Fig. 3 Effect of relative velocity ratio on the mixing efficiency (unlike doublet element, oxidizer orifice diameters of 0.4, 0.5, 0.6 mm)

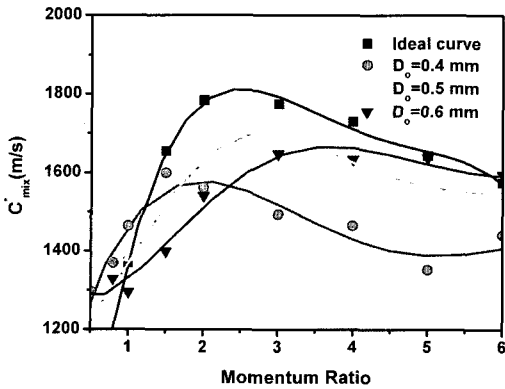


Fig. 4 Effect of diameter ratio on the mixing characteristic velocity of unlike doublet element

사공의 직경이 0.75 mm 이하의 제트에서는 혼합효율의 개선이 미비하다는 종래의 실험결과와도 일치하는 것이다. 본 연구에서는 다른 직경비를 갖는 각 제트의 최대 혼합효율이 나타나는 지점에서의 제트 속도비가 Fig. 3에서 보는 바와 같이 0.65~0.7의 아주 협소한 범위에 있는 매우 흥미로운 현상이 나타났다.

Figure 4는 분사공 직경비에 따른 혼합비배적인 특성속도를 나타내었다. 특성속도는 추진체의 유효에너지 레벨과 인젝터 설계의 질을 반영한다. 여기서 혼합특성속도는 연소실 압력 200 psi의 환경에서 산화제 분사공 직경변화에 따른 분사 연소 성능을 평형화학 반응에 의한 이론 연소 방법으로 혼합비배적임을 가정하여 계산하였다<sup>(11)</sup>. 혼합의 질은 분사 파라메타에 따라 좌우되기 때문에 특성속도는 혼합비의 함수로 정의된다.

특성속도의 최대값은 최대 혼합효율을 나타내는 점과 일치하지 않는 실험결과가 도출되었다.

즉 직경비 1의 경우 혼합효율은 모멘텀비 1에서 최대를 나타내는데, 특성속도는 모멘텀비 2.3정도에서 최대를 나타낸다. 다른 직경비에서도 거의 동일한 경향을 나타내었다. 또한 이상특성속도와 혼합특성속도의 절대값은 차이가 있으나, 모든 직경비에서 특성속도의 추이는 이상특성속도 곡선과 같은 경향을 나타내었다. 또한 모멘텀비 1에서 각 직경비를 가진 제트의 혼합특성속도를 보면 혼합효율에 비해 그 차가 매우 작다. 이러한 이유들로 보아 혼합효율과 혼합특성속도는 비례적이지 않음을 알 수 있다.

4.2 분리 삼중충돌 인젝터

다른 분사공 직경비를 갖는 분리 삼중충돌 제트의 혼

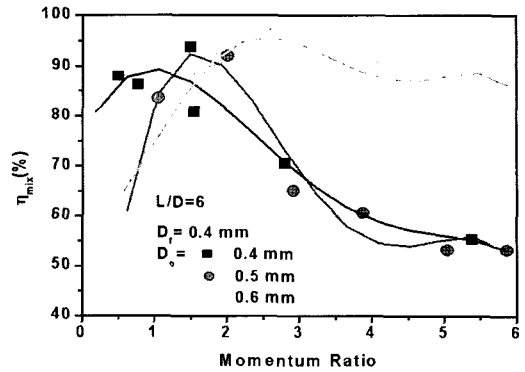


Fig. 5 Effect of diameter ratio on the mixing efficiency of unlike split triplet element

합효율을 모멘텀비에 따라 Fig. 5에 나타내었다 여기서 모멘텀비의 증대는 측면제트(연료)의 모멘텀은 고정시키고 중앙제트(산화제)의 모멘텀비를 증가시키는 것을 의미한다. 분사공 직경비 1일 때 최대 혼합효율은 이중충돌식 제트와 마찬가지로 모멘텀비 1에서 최대를 나타낸다. 모멘텀비 1일 때 두 제트사이의 모멘텀 교환과 침투깊이의 범위는 동일하고 혼합정도는 균일하다.

최대 혼합효율은 직경비가 증가할수록 모멘텀비가 증가하는 방향에서 나타난다. 이것은 앞서 언급한 실험결과와 같은 경향을 나타낸 것이다. 그러나 이중충돌형 제트의 최대 혼합효율이 모든 직경비에서 거의 변화가 없는 것과는 달리, 최대 혼합효율이 직경비 1과 1.25에서는 거의 변화하지 않다가 직경비 1.5에서 확연하게 증가함을 알 수 있다. 즉 분리 삼중충돌형 제트의 경우 직경비 1.25까지는 직경비 1.5의 경우보다 직경비 증가에 덜 민감한 것으로 판단된다.

또한, Fig. 6에서 나타나듯이 분리 삼중충돌식 제트

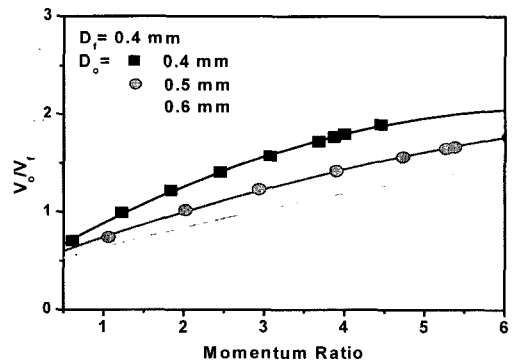


Fig. 6 Effect of relative velocity ratio on the mixing efficiency (split triplet element, oxidizer diameters of 0.4, 0.5, 0.6 mm)

또한 앞선 실험결과 같이 최대 혼합효율이 나타날 때의 상대제트 속도비가 0.85~0.9정도의 아주 협소한 범위에 있음을 나타내었다. 혼합효율 측면에서 분사공 직경비 변화를 언급하지 않는다 하더라도, 분리 삼중충돌식 제트는 92~96%의 혼합효율을, 이중충돌식 제트의 혼합효율은 82~85%를 나타내었다. 즉 혼합효율 면에서 분리 삼중충돌식 제트가 더 우수함을 알 수 있다.

식 (3)은 충돌각 60°인 이중충돌식 제트에 대한 최대 혼합효율과 분사공 면적비에 대한 관계를 나타낸 것이다<sup>(8)</sup>. 본 연구의 이중충돌식 제트와 분리 삼중충돌식 제트의 분사공 직경비가 혼합에 미치는 영향을 좀 더 명확히 하고, 수치적으로 접근하기 위해 식 (3)을 사용하여 혼합계수  $M$ 값을 계산하였다.

$$\left(\frac{D_c}{D_{out}}\right)_{MME}^2 = M \left[ \frac{\rho_{out}}{\rho_c} \left(\frac{W_c}{W_{out}}\right)^2 \right]^{0.7} \quad (3)$$

여기서 혼합계수(mixing factor)  $M$ 은 수류시험을 통해 최대 혼합효율에서의 직경비의 영향을 수치화 하였다<sup>(8)</sup>.

계산결과 직경비 1.0, 1.25, 1.5에 대해 이중충돌식 제트의 경우 혼합계수 값이 1.0, 0.76, 0.7로 나타났다. 이는 이중충돌식 제트의 경우 모멘텀비 1에서 최적의 혼합상태를 나타내고, 직경비 1.22 이후부터는 혼합의 정도가 거의 변화가 없음을 다시 한번 확인시켜주는 결과이다<sup>(8)</sup>.

분리 삼중충돌식의 경우 직경비 1, 1.25, 1.5에 대해 혼합계수 값은 0.73, 0.77, 0.44를 나타내었다. 최대혼합효율에 대한 혼합계수는 분사공 직경비 1.25에서 약 0.75를 나타내었다. 이러한 결과로부터 분리 삼중충돌 제트의 경우 직경비 1.25 이후에서는 직경비의 영향이

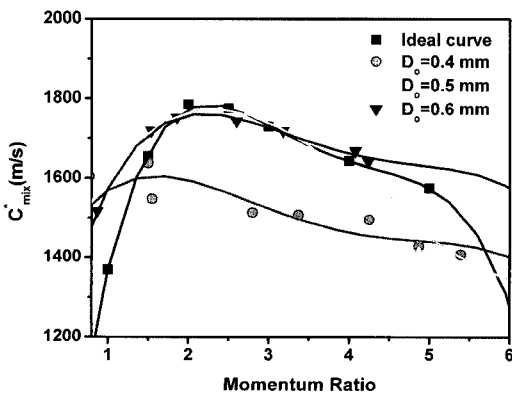
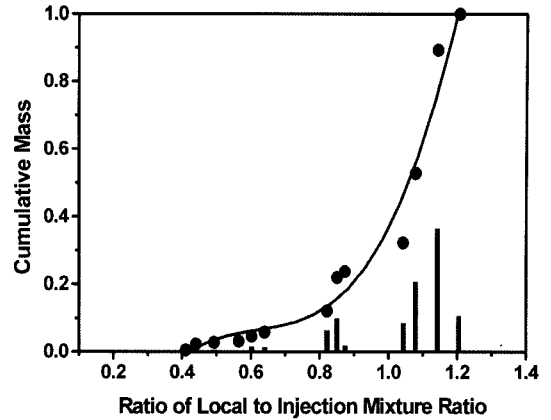
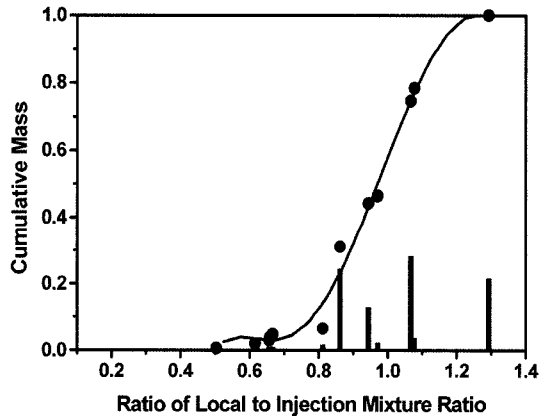


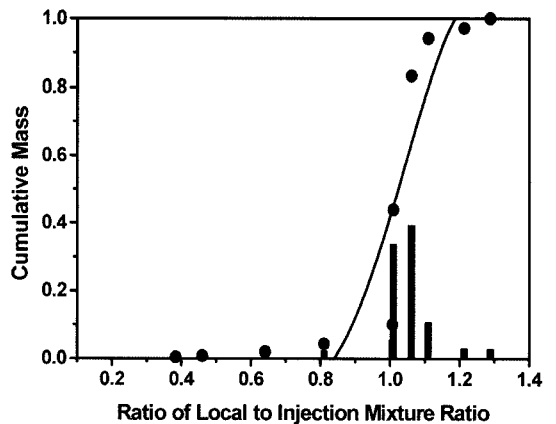
Fig. 7 Effect of diameter ratio on the mixing characteristic velocity variation of the split triplet element



(a)  $D_o=0.4$  mm



(b)  $D_o=0.5$  mm



(c)  $D_o=0.6$  mm

Fig. 8 Cumulative mass in terms of the ratio of local to injection mixture ratio in the case of optimum mixing of the split triplet element with oxidizer diameter of (a) 0.4 mm, (b) 0.5 mm and (c) 0.6 mm, respectively

감소함을 알 수 있다. 결론적으로 이중충돌식 제트가 분리 삼중충돌식 제트에 비해 혼합에 대한 분사공 직경비의 영향을 더 크게 받는다고 판단된다.

Figure 7에 직경비 변화에 따른 혼합지배적인 특성속도를 나타내었다. 직경비 1.25, 1.5에서 거의 같은 특성속도를 나타내었으며, 특히 이중충돌식 제트와 달리 직경비 1.25, 1.5에서의 특성속도는 거의 이상(ideal) 특성속도에 근접해 있음을 알 수 있다. 그러나 직경비 1인 경우 이중충돌식 제트와 마찬가지로 전체적인 모멘텀비에서 혼합특성 속도는 낮게 나타났다.

Figure 8은  $mr/(1+mr)$ 로 정의되는 정규화된 국소 혼합비( $Mr$ )에서 추진제 누적질량(히스토그램)과 누적질량 분포(곡선)를 보여주고 있다. 임의의 정규화된 국소 혼합비 값에서 히스토그램이 집중될수록 분무가 채집된 각각의 격자에서의 국소 혼합비가 임의의 값에 근접한다. 또한 이러한 경우 누적질량분포 곡선의 기울기 값도 급속히 증가하게 된다. 그러므로 히스토그램이 정규화된 혼합비 1.0에 집중될수록 보다 우수한 혼합특성을 보이게 된다.

Figure 5와 8에서 보는 바와 같이 정규화된 국소 혼합비 값이 1에 가까울수록(Fig. 8) 혼합효율이 보다 우수해진다(Fig. 5)는 것을 알 수 있다.

## 5. 결 론

이중충돌형 제트와 분리 삼중충돌형 제트의 분사공 직경비에 따른 혼합특성에 대해 실험적으로 연구하였다. 모멘텀비와 분사공 직경비에 따른 국소질량 및 혼합비 분포를 측정하여 혼합특성을 파악하였으며, 비반응 모의추진제로 액체산소 케로신 조합을 대신하여 물과 케로신 조합을 사용하였다. 혼합지배적인 연소효율에 대한 분사공 직경비의 영향을 산화제와 연료의 모멘텀비로 나타내었고 이로부터 도출된 연구결과는 다음과 같다.

1) 이중충돌식 제트와 분리 삼중충돌식 제트에 대한 최대 혼합효율은 직경비가 증가할수록 더 높은 모멘텀비에서 나타난다. 또한 최대 혼합효율은 거의 변화하지 않지만, 직경비가 증가할수록 점진적으로 개선됨을 알 수 있다.

2) 최대 혼합효율을 나타내는 점에서의 상대제트 속도비는 일정한 매우 작은 범위에서 나타났다. 이중충돌식 제트의 경우 상대 속도비가 0.65~0.7로, 분리 삼중충돌형 제트에서는 0.85~0.9로 나타났다.

3) 혼합에 대한 직경비의 영향은 이중충돌형 제트가 분리 삼중충돌형 제트에 비해 더 크게 나타남을 알 수 있다. 최적의 혼합은 이중충돌식 제트의 경우 직경비 1.25에서 나타났으며, 분리 삼중충돌식의 경우 직경비 1.5에서 나타났다.

4) 분리 삼중충돌식 제트는 본 연구의 범위 내에서 이중충돌식 제트에 비해 혼합과 혼합지배적인 특성속도 측면에서 더 우수한 것으로 나타났으나, 직경비의 영향은 이중충돌형 제트가 더 크게 받는다. 분리 삼중충돌형 제트의 경우 최적혼합상태의 혼합계수(mixing factor)는 0.75이다.

## 참고문헌

- (1) J. H. Rupe, "The Liquid Phase Mixing of A Pair of Impinging Streams," JPL Prog. Rept. No.20-195, August 1953.
- (2) J. H. Rupe, "A Correlation between the Dynamic Properties of a Pair of Impinging Streams and the Uniformity of Mixture Ratio Distribution in the Resulting Spray," Jet Propulsion Lab, Progress Rept. 20-209, 1956
- (3) J. H. Rupe, "Experimental Studies of the Hydrodynamics of Liquid Propellant Injector," Jet Propulsion Lab, C.I.T., External Publication 388, Pasadena, CA, June 1957.
- (4) Heidmann, M. F., Priem, R, J. and Humphrey, J. C., "A Study of Sprays formed by Two Impinging Jets," NACA Technical Note 3855, March 1957.
- (5) Dombrowski, N. and Hopper. P. C., "A Study of the Sprays Formed by Impinging Jets in Laminar and Turbulent Flow," J. Fluid Mechanics, Vol. 18, Part 3, 1963. pp.392~400.
- (6) Kazuo SATO, "A Study of /Almine Injector Elements Part 1. Cold Flow Test," NAL Report, TR-899, 1986, pp.1~13.
- (7) Y. H. Cho, S. W. Lee, W. S. Yoon and Y. S. Kim, "Effect of Orifice Diameter Ratio on the Mixing Characteristics of Unlike Impinging Injectors," AIAA2002-0343, January 14-17, 2002.
- (8) Won, Y. D., Cho, Y. H., Lee, S. W., and Yoon, W. S., "Effect of Momentum Ratio on the Mixing Performance of Unlike Split Triplet Injectors," J. of Propulsion and Power, Vol. 18, No. 4., July-August, 2002.

- (9) Liquid Rocket Engine Injectors, NASA SP-8089, 1986.
- (10) Nurick, W. H., and McHale, R. M., "Noncircular Orifice Holes and Advanced Fabrication Techniques for Liquid Rocket Injectors, Phase I Final Report," NASA CR-108570. 1984.
- (11) Sato, K., "A Study of N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> /Amine Injector Elements Part 1. Cold Flow Test," NAL Report, TR-899, 1986, pp.1~13.
- (12) Anderson, W. E., Ryan, H. M., Pal, S., and Santoro, R. J., "Fundamental Studies of Impinging Liquid Jets," AIAA 92-0458, January 6-9, 1992.
- (13) Heohn, F. W., Rupe, J. H., and Sotter, J. G., "Liquid-Phase Mixing of Bipropellant Doublets, Technical Report 32-1546," Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Calif., Apr. 20, 1972.
- (14) Wrobel, J. R., "Some Effects of Gas Stratification on Choked Nozzle Flows," J. of Space-craft, Vol. 2, No. 6, 1965.
- (15) Gordon, S., and McBride, B. J., "Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Composition, Rocket Performance, Incident and Reflected Shocks and Champman-Jouguet Detonations," NASA SP-273, 1971.
- (16) 조용호, 이성웅, 윤용섭, "이중 충돌제트의 혼합성능 연구," 한국항공우주학회지, 제31권 4호, 2003년 5월.